

# Células solares de plástico: Un reto para los nuevos materiales orgánicos del siglo XXI

Nazario Martín, José L. Segura y Rafael Gómez

*Departamento de Química Orgánica, Facultad de Química, Universidad Complutense,  
E-28040 Madrid, Spain*

## 1. INTRODUCCIÓN

Una de las mayores preocupaciones en la sociedad actual es la de frenar el deterioro medioambiental que supone la utilización de los combustibles fósiles que, actualmente, representan cerca del 80% de la energía consumida en el mundo. Especialmente desde el comienzo de los años 90, las consideraciones ecológicas asociadas con el problema del calentamiento global debido a los elevados niveles de CO<sub>2</sub> han hecho que la utilización de la energía solar, eólica así como otras formas de energía renovables estén encontrando mercados en los que pueden competir con ventaja frente a otras fuentes de energía más contaminantes<sup>1</sup>. No obstante, los todavía relativamente altos costes de fabricación de los dispositivos necesarios para el aprovechamiento de estas fuentes de energía hacen pensar que será necesario el esfuerzo conjunto de científicos de distintas áreas para desarrollar aún mejores materiales para ser probados en distintos dispositivos con el fin de optimizar la configuración de los mismos.

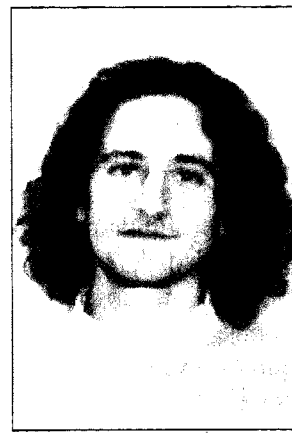
Entre éstas fuentes de energía renovables, la energía proveniente del Sol presenta un interés especial. Teniendo en cuenta que el Sol arroja sobre la Tierra una cantidad de energía (5% uv, 43% visible, 52% IR) que excede el consumo mundial anual en varios miles de veces y que España, por su privilegiada situación y climatología, se ve particularmente



José L. Segura



Nazario Martín



Rafael Gómez

favorecida ya que sobre cada metro cuadrado de su suelo inciden al año unos 1500 kilovatios-hora de energía, sería irracional no intentar aprovechar, por todos los medios posibles, esta fuente de energía gratuita, segura, limpia e inagotable.

Tras el descubrimiento del efecto fotovoltaico por Edmond Becquerel en 1839, este fenómeno se mantuvo durante un largo periodo únicamente como objeto de investigación académica sin utilizarse en aplicaciones prácticas. Los primeros diodos fotovoltaicos de silicio se fabricaron poco después de la introducción del silicio como primer material semiconductor en 1950. En los años 70, y como consecuencia de la crisis del petróleo, se produjo, por primera vez, una percepción generalizada de la limitación de los recursos fósiles que condujo a que distintos países comenzasen a desarrollar ambiciosos proyectos para la utilización de fuentes de energía alternativas haciendo

especial hincapié en el aprovechamiento de la energía solar. Las últimas dos décadas han sido testigos de un excepcional desarrollo de los módulos fotovoltaicos y la producción de los mismos se ha incrementado en un promedio del 18% anual<sup>2</sup>. Lamentablemente, a pesar de esta evolución, será necesario el transcurso de varias décadas para que la utilización de módulos solares contribuya de manera significativa al total de la energía eléctrica consumida.

Indudablemente, un requisito indispensable para el desarrollo de esta tecnología es el abaratamiento de los costes de fabricación de los paneles solares. Por tanto, la contribución que los químicos podemos aportar debe ser la de sintetizar materiales que puedan ser fabricados de manera más económica que los utilizados actualmente y que puedan incorporarse a los dispositivos fotovoltaicos sin necesidad de utilizar costosas técnicas de procesado.

## 2. CÉLULAS SOLARES ORGÁNICAS

El desarrollo de células solares estables basadas en materiales orgánicos puede proporcionar una nueva vía tanto para la explotación de la energía solar como para satisfacer la cada vez más elevada demanda de tecnología para fabricar fotodetectores más sofisticados. Las células orgánicas solares deben cumplir una serie de requisitos en términos de estabilidad, eficiencia y coste con el fin de poder competir con la actual tecnología del silicio y para poder encontrar nuevas aplicaciones. Los materiales orgánicos presentan ventajas desde el punto de vista de los costes de fabricación, el posible impacto en la seguridad medioambiental y fundamentalmente por la posibilidad de producir dispositivos flexibles, que absorban la radiación a distintas longitudes de onda y en los que es posible modular las propiedades electrónicas haciendo uso de los recursos que proporciona la síntesis orgánica. Estas propiedades suponen un avance significativo en el diseño de dispositivos electrónicos.

Las células solares que utilizan materiales orgánicos para su fabricación pueden clasificarse en dos tipos fundamentales.

- Basadas en películas de materiales semiconductores sensibilizadas por colorantes
- Basadas exclusivamente en materiales orgánicos tanto moleculares como poliméricos

En cualquier caso, aún no se ha establecido claramente a qué células se les puede aplicar la denominación de "células solares orgánicas" ni tampoco se han establecido las fronteras entre los distintos tipos de células. Por lo tanto, la clasificación que se va a utilizar en este artículo debe entenderse como la escogida por los autores del mismo ya que esta clasificación aún se encuentra en fase de debate por parte de la nueva comunidad científica dedicada al desarrollo de este nuevo tipo de estructuras.

Por otro lado, dado que el artículo está escrito por químicos y los lectores serán, fundamentalmente, químicos, no se pretende estudiar de manera exhaustiva el mecanismo del funcionamiento de estas células sino más bien presentar, por un lado, los tipos fundamentales de materiales orgánicos que pueden encontrar aplicación en la fabricación de las mismas y, por otro, mostrar las principales modificaciones llevadas a cabo en la estructura de estos compuestos con el fin de mejorar las prestaciones de los dispositivos.

Aunque las mejores prestaciones hasta el momento se han observado en las células solares basadas en películas de semiconductores inorgánicos con sensibilizadores orgánicos, es muy escasa la variedad de materiales orgánicos utilizados con este fin y son pocos los estudios dedicados a la influencia de las modificaciones estructurales sobre las prestaciones de los dispositivos. Por lo tanto, tras una breve presentación de este tipo de células, el artículo se centrará en las células fotovoltaicas

fabricadas exclusivamente a partir de materiales orgánicos y en las mejoras alcanzadas gracias a las modificaciones de tipo químico.

### 2.1 Células solares basadas en películas de materiales semiconductores sensibilizadas por colorantes

La utilización de células solares basadas en películas mesoporosas de  $\text{TiO}_2$  sensibilizadas por colorantes conocidas como *células de Grätzel* se ha propuesto en la última década como una alternativa a los dispositivos convencionales en estado sólido.

Como base del dispositivo se utiliza una capa mesoporosa compuesta por una red de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  que se han agregado para conseguir conductividad eléctrica. Adherida a este film nanocrystalino se encuentra una monocapa de un colorante que presente transferencia de carga. La fotoexcitación de este último conduce a la inyección de un electrón en la banda de conducción del óxido. El colorante vuelve a su

Tabla 1 Células solares orgánicas

Tipo de célula solar	Estado actual (Eficiencia)	Estructura	Barreras comerciales	Últimas mejoras
Basadas en materiales de bajo peso molecular	1.1 %	Contactos en estado sólido de semiconductores orgánicos cristalinos	Intensidad y potencial alcanzados	Síntesis de materiales con mayor movilidad de los portadores de carga
Basadas en materiales poliméricos	1%	Contactos en estado sólido de interfases polímeros- $\text{C}_{60}$	Intensidad alcanzada y separación de fases	Mejores polímeros y mejoras en la miscibilidad polímero- $\text{C}_{60}$
Semiconductores sensibilizados por colorantes	11.0 %	Electrodos de óxido de titanio mesoporoso sensibilizado con colorantes orgánicos	La sustitución de electrolitos líquidos por sólidos conductores de electrones	Mejores contactos en estado sólido

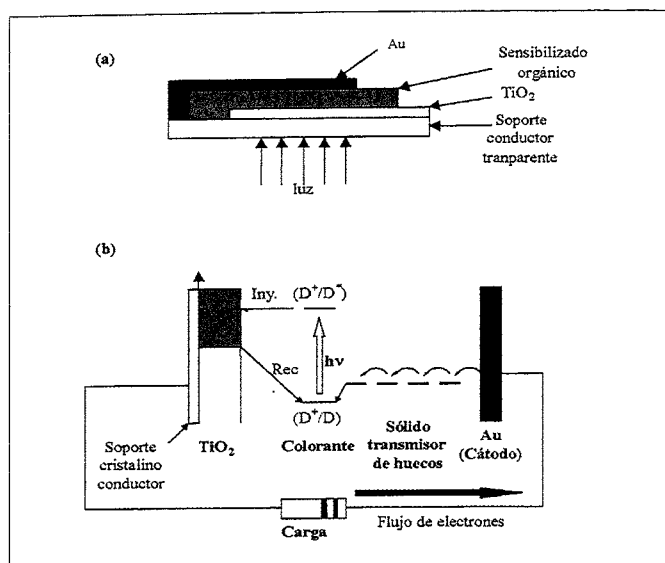


Figura 1. Representación esquemática (a) de una célula solar de Grätzel y (b) su funcionamiento. Un colorante, tras ser fotoexcitado, cede un electrón a la banda de conducción (B. C.) del óxido de titanio (material semiconductor). El estado original del colorante se recupera por donación de un hueco desde un sólido transmisor de huecos.

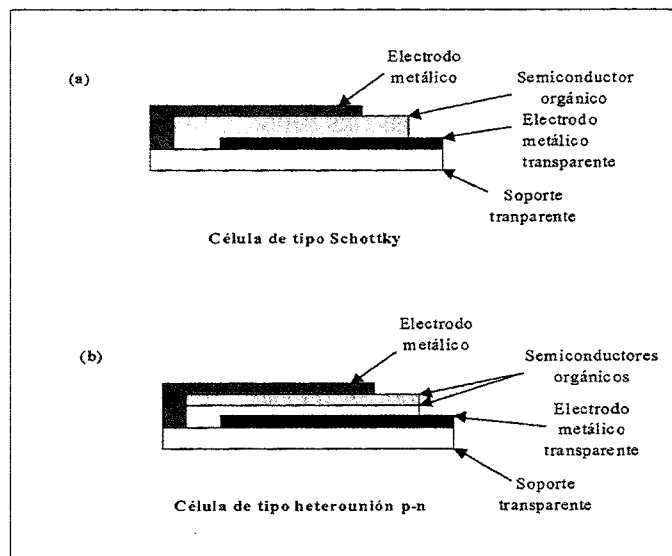


Figura 3. Configuraciones de célula de tipo (a) Schottky y (b) heterounión p-n.

estado original mediante la donación de un electrón por parte de un electrolito, generalmente un disolvente orgánico conteniendo el sistema redox yodo/triyoduro. El potencial generado tras iluminar corresponde a la diferencia de energía entre el nivel de Fermi del electrón en el sólido y el potencial redox del electrolito. En conjunto, se genera energía eléctrica sin que se produzca una transformación química permanente.

Se han conseguido eficiencias de conversión (energía obtenida frente al total de energía que incide sobre la célula) superiores al 10% mediante la utilización de estas configuraciones de células solares<sup>4</sup>. Una mejora significativa desde el punto de vista práctico ha sido la utilización de materiales transportadores de carga sólidos en lugar de los electrolitos líquidos<sup>5,6</sup>. En este sentido, se han utilizado semiconductores de tipo *p* así como materiales orgánicos (arilaminas). En este caso el colorante excitado cede electrones al óxido de titanio y se regenera mediante la cesión de huecos desde el material transportador de huecos (Figura 1).

Los materiales utilizados como sensibilizadores orgánicos en este tipo de células deben absorber toda la luz por debajo de un umbral de

longitud de onda de 900 nm (límite de la luz visible). Además debe ser posible anclarlos firmemente a la superficie del semiconductor e inyectar electrones a la banda de conducción con rendimientos cuánticos próximos a la unidad. Sus potenciales redox deben ser suficientemente altos como para poder ser regenerados rápidamente mediante la donación de electrones desde el electrolito o el transportador de huecos. Por último, deben ser estables para soportar al menos  $10^8$  ciclos de iluminación lo que corresponde a unos 20 años de exposición a la luz natural. Las mejores prestaciones, tanto en términos de rendimiento de conversión como de estabilidad a largo

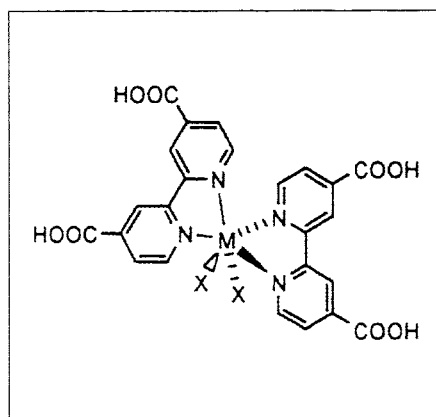


Figura 2.

plazo, se han observado para complejos de bipyridinio de rutenio y osmio. En la figura 2 se encuentra representada la estructura de sensibilizadores de fórmula general  $ML_2X_2$ , donde L corresponde al ácido 2,2'-bipyridil-4,4'-dicarboxílico, M corresponde a Os o Ru y X a sustituyentes de tipo halógeno, cianuro, tiocianato o agua que han sido utilizados con éxito en este tipo de células.

Dos líneas de trabajo son las que se siguen con mayor interés para el desarrollo de este tipo de células: (a) por un lado, el diseño y síntesis de sensibilizadores que extiendan su acción no sólo al rango del espectro visible sino alcanzando, también, la zona del infrarrojo próximo y (b) la mejora de las interfases entre el sensibilizador y el semiconductor inorgánico, así como con la capa transportadora de huecos.

## 2.2 Células solares basadas exclusivamente en materiales orgánicos

Los dispositivos fotovoltaicos basados únicamente en materiales orgánicos han atraído en los últimos años un gran interés como consecuencia de su ligereza, bajo coste de fabricación y la posibilidad de fabri-

car películas finas de estos materiales sobre superficies relativamente grandes<sup>7</sup>. Se han utilizado distintas configuraciones de células como las denominadas de tipo-Schottky o células con heterouniones p-n (Figura 3) conteniendo tanto materiales moleculares como poliméricos.

En las células de tipo Schottky, una monocapa de material orgánico se coloca entre dos electrodos [uno de ellos con alta función de trabajo ( $\phi_w$ ) y otro con baja  $\phi_w$ ] para formar una barrera de Schottky en la capa orgánica en la interfase con el electrodo metálico<sup>8</sup>. Por otro lado, las células con heterouniones de tipo p-n están basadas fundamentalmente en estructuras en doble capa con varias películas de materiales orgánicos. La interfase entre las capas orgánicas juega un papel fundamental en las prestaciones de este tipo de células mientras que los electrodos únicamente proporcionan contactos ohmicos entre las capas orgánicas. Las células con heterouniones de tipo p-n tienen algunas ventajas sobre las de tipo Schottky ya que no necesitan utilizar electrodos metálicos de baja  $\phi_w$  que se oxidan con facilidad, disminuyendo la vida de los dispositivos.

El principal problema que presentan los semiconductores orgánicos moleculares es que los estados excitados generados tras la absorción de fotones son generalmente excitones que tienen una energía de unión relativamente grande por lo que no se disocian para generar electrones y huecos. Por lo tanto, la ionización de tipo excitónica no parece ser un método adecuado para la generación de fotocargas por lo que se han utilizado con mayor éxito las células con configuraciones de tipo heterounión p-n ya que las interfases entre semiconductores moleculares o con electrodos pueden proporcionar las características de diferencia de energía necesarias para que se produzca la separación de cargas tras la fotoexcitación. Así, Tang y colaboradores<sup>9</sup> consiguieron algunos de sus mejores resultados utilizando células a partir de un soporte cristali-

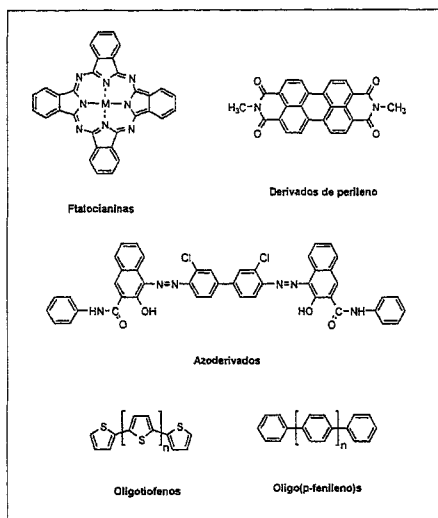


Figura 4.

no recubierto por una lámina de un material conductor transparente (óxido de indio y estaño, ITO) sobre la que se depositaron sucesivamente, mediante sublimación, láminas de ftalocianina de cobre (semiconductor colector de huecos) y de un derivado de perileno sobre el que se depositó finalmente un electrodo de plata. Tras la excitación con luz, los excitones pueden difundir hasta la interfase entre los dos semiconductores orgánicos donde se ionizan. Los huecos se transportan a través de la capa de tipo p de ftalocianina de cobre hasta el electrodo de ITO mientras que los electrones son transportados a través

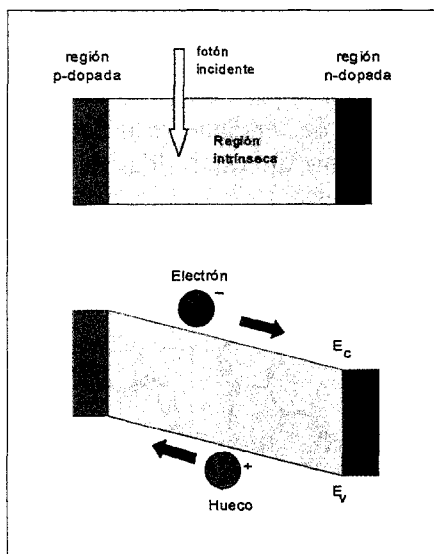


Figura 5. En un semiconductor convencional, la absorción de luz genera un campo eléctrico que separa las cargas fotoinducidas.  $E_c$  y  $E_v$  son las energías en las bandas de conducción y de valencia, respectivamente,

de la capa de tipo n del derivado de perileno hasta el electrodo de plata pudiendo por lo tanto recogerse los electrones y los huecos. Se han encontrado eficiencias de conversión para este tipo de estructuras de hasta un 1%. Resultados análogos se han encontrado para otros materiales moleculares fotoconductores<sup>10</sup> como diazoderivados, oligotiofenos y oligo(fenilenvinileno)s (Figura 4)<sup>11</sup>.

Los bajos valores encontrados para la eficiencia de conversión en estos dispositivos fotovoltaicos son debidos a la baja eficiencia de fotogeneración de portadores de carga, así como la elevada resistividad eléctrica de los materiales orgánicos derivada de la baja movilidad y baja densidad de portadores de carga. Todo esto, junto con las excelentes prestaciones de este tipo de moléculas orgánicas como fotorreceptores xerográficos para la industria de las fotocopiadoras (más del 90% de los fotorreceptores xerográficos están hechos de fotoconductores orgánicos) hizo que el estudio de la posible aplicación de moléculas orgánicas para la fabricación de células fotovoltaicas se mantuviera en estado latente durante casi una década.

Un nuevo impulso para la investigación en este campo surgió tras la publicación, de manera casi simultánea en los primeros años 90, de la fabricación de células fotovoltaicas a partir de (i) películas formadas por mezclas de polímeros<sup>12</sup> conductores con carácter dador (D) y aceptor (A) y (ii) dispositivos con heterouniones polímero conjugado /C<sub>60</sub><sup>13</sup>.

La utilización de polímeros para la fabricación de células fotovoltaicas resulta muy atractiva ya que es posible pensar en depositar películas de polímeros sobre grandes superficies con las propiedades de estabilidad y resistencia a la cristalización características de estos materiales. Además, los polímeros conjugados actúan también como semiconductores, y sus propiedades electrónicas parecen ser análogas a las de los semiconductores inorgánicos<sup>14</sup>. Esto es debido a la deslocalización del sistema  $\pi$

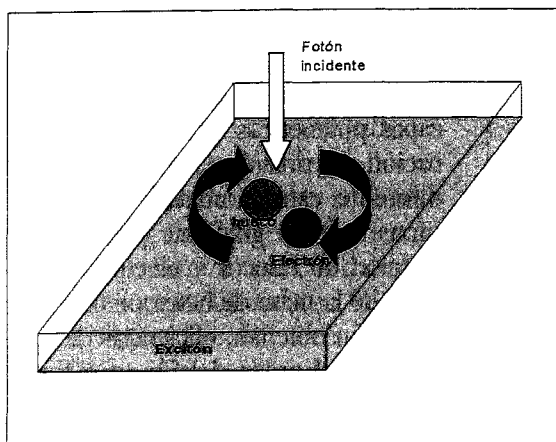


Figura 6. Generación de excitones en un polímero conjugado. Un fotón incidente produce pares electrón-hueco fuertemente unidos llamados *excitones* que son los transportadores de carga en las células fotovoltaicas.

aprovechamiento de la luz visible.

La principal diferencia entre los semiconductores convencionales y los polímeros conjugados es que en los primeros el electrón excitado y el hueco resultante migran libremente hacia electrodos opuestos (Figura 5) mientras que en los segundos el electrón y el hueco que se generan tras incidir un fotón se encuentran ligados en forma de excitón (Figura 6).

¿Cómo es posible aprovechar las propiedades de los polímeros si los electrones y huecos no están separados? Mediante la creación de interfases entre polímeros conductores con diferente afinidad electrónica

posibilitando así la transferencia electrónica entre polímeros. Este proceso, conocido como transferencia electrónica fotoinducida, consigue separar las cargas (Figura 7), y la unión creada en la interfase dador-aceptor es análoga a las heterouniones de semiconductores convencionales.

Este proceso, conocido como transferencia electrónica fotoinducida, consigue separar las cargas (Figura 7), y la unión creada en la interfase dador-aceptor es análoga a las heterouniones de semiconductores convencionales.

Junto con las configuraciones de célula de tipo Schottky y heterounión p-n vistas anteriormente (Figura 3), también se han utilizado las denominadas células fotoelectroquímicas<sup>15</sup> en las que un electrolito sólido de tipo polimérico se sitúa

entre el electrodo de ITO recubierto por una lámina del polímero conjugado y un electrodo recubierto con ITO-platinizado que actúa como contraelectrodo (Figura 8).

Aunque la investigación sobre los polímeros conjugados en el campo

de las células fotovoltaicas se encuentra aún en su infancia, los resultados obtenidos hasta el momento son muy prometedores. Algunos de los polímeros conjugados utilizados en la fabricación de células fotovoltaicas se muestran en la figura 9,<sup>16</sup> habiéndose obtenido los mejores resultados utilizando un derivado de politiofeno como aceptor de huecos, con una eficacia de conversión del 7% al irradiar con luz verde, y aproximadamente un 2% con luz solar<sup>12b</sup>. No obstante, existen relativamente pocos estudios dedicados a la mejora en la eficiencia de células fotovoltaicas con polímeros conjugados debido, probablemente, a que aún no se conocen con precisión los procesos fundamentales que tienen lugar en la formación del excitón, la difusión del mismo y la transferencia electrónica

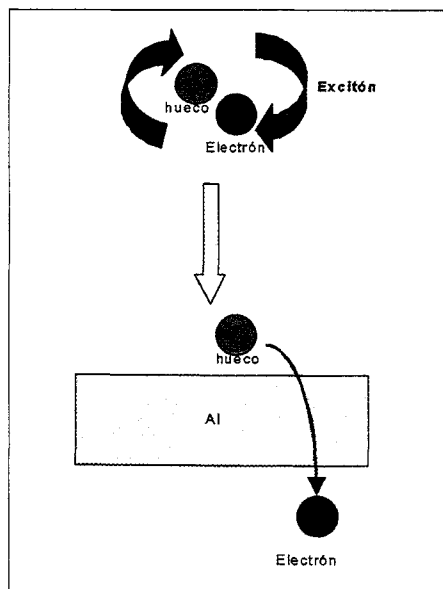


Figura 7. Disociación de los excitones en las interfases entre materiales con distintas energías de ionización y afinidad electrónica.

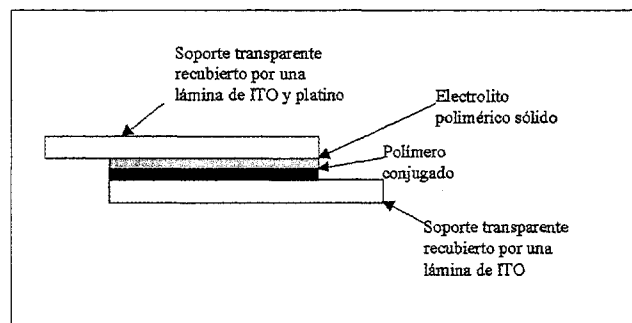


Figura 8. Configuraciones de célula de tipo fotoelectroquímica.

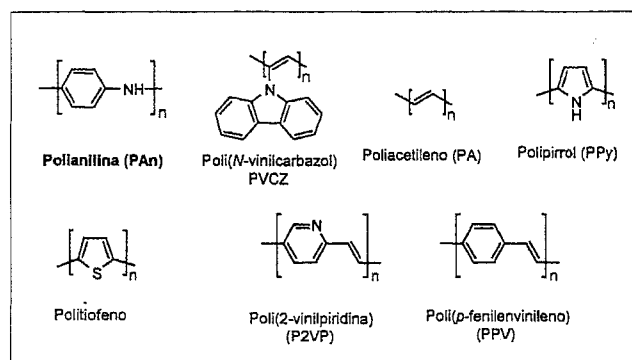


Figura 9. Algunos polímeros conjugados utilizados en la fabricación de células fotovoltaicas.

en las interfases. Por ello, será necesario dedicar un gran esfuerzo para entender los procesos que tienen lugar desde la absorción del fotón hasta la generación de un potencial eléctrico. El conocimiento de estos procesos nos darán la pauta para lle-

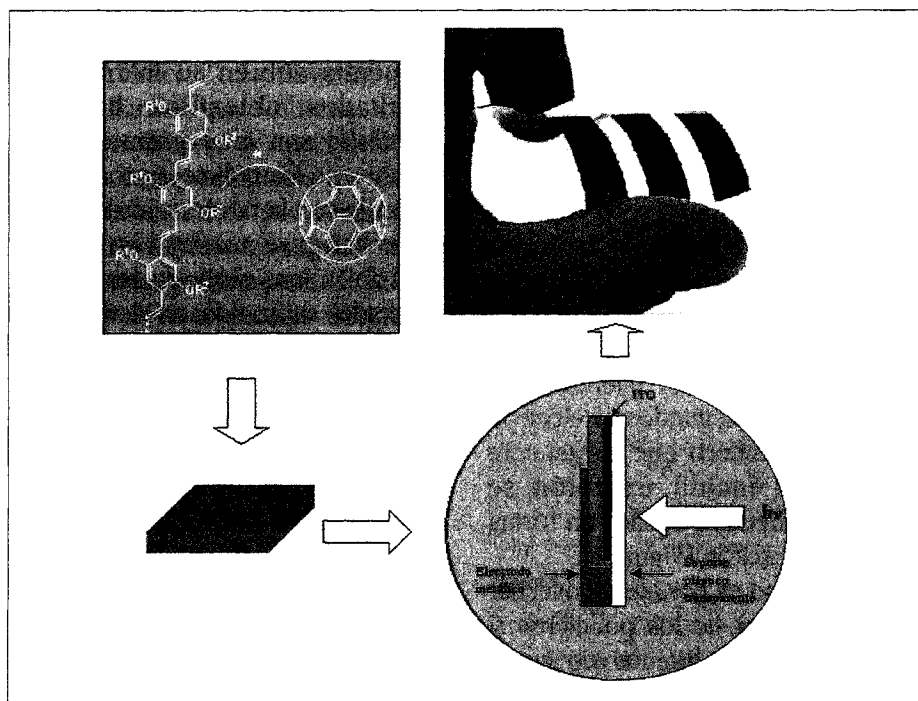


Figura 10.

var a cabo el diseño y síntesis de nuevos sistemas poliméricos que permitan optimizar las prestaciones de los dispositivos.

### 2.3 El concepto de heterounión en masa

Las células fotovoltaicas constituidas exclusivamente con polímeros conjugados presentan energías de conversión de  $10^{-3}$ - $10^{-2}$  %, valores demasiado bajos para ser utilizados en aplicaciones prácticas.

Como se dijo anteriormente, de manera casi simultánea a la publicación de la fabricación de células fotovoltaicas utilizando polímeros, se dio a conocer que en mezclas constituidas por polímeros conjugados y [60]fullereno tenían lugar fenómenos de transferencia electrónica fotoinducida (Figura 10)<sup>17</sup>. La escala de tiempos para la transferencia de carga fotoinducida en este tipo de sistemas es  $10^3$  veces más rápida que la desactivación no radiativa de las especies generadas tras la fotoexcitación. Así, la transferencia electrónica a través de una interfase dador-aceptor en la que el dador es un polímero conjugado y el aceptor es un derivado de  $C_{60}$  proporciona un método eficaz

para evitar la recombinación de las cargas de signo opuesto, con lo que aumenta significativamente la respuesta de los sistemas. Por ejemplo, mediante la adición de tan sólo un 1% de  $C_{60}$ , la fotoconductividad de los derivados de PPV aumenta en un orden de magnitud con respecto a la del polímero puro.

En estos sistemas la matriz polimérica asegura el transporte de las cargas positivas, mientras que los electrones viajan a través de los dominios en contacto de fullereno.

Por tanto, el uso de materiales composites en los que las fases D/A interpenetran mutuamente aparecen como materiales fotovoltaicos ideales. Ya que cualquier punto en el composite se encuentra a tan solo unos pocos nanómetros de una interfase D/A, estos composites se comportan como un material con heterouniones D/A en toda la masa.

En este sentido, se han hecho importantes pro-

gresos para la creación de materiales con "heterouniones D/A en masa" mediante el proceso de fusión de dos capas poliméricas diferentes por aplicación de presión (laminación)<sup>18</sup>. La diferente estequiometría de las dos capas crea un gradiente para la conducción de huecos y electrones a lo largo de la masa de heterounión.

Se han obtenido eficiencias de conversión del orden del 5% en sistemas polímero- $C_{60}$ <sup>13</sup> y, dado el carácter plástico de los polímeros conjugados y del soporte utilizado para la fabricación de las mismas, ha sido posible obtener células muy planas, ligeras y flexibles (Figura 10) de áreas de gran tamaño (6cm x 6cm y 15cm x 10cm) con los elementos fotovoltaicos sobre sustratos de plástico flexible recubierto de ITO, que permite pensar en aplicaciones realistas para este tipo de sistemas (teléfonos móviles, relojes, calculadoras, etc.).

El principal problema encontrado en las mezclas obtenidas entre los polímeros y los derivados de  $C_{60}$  es su falta de miscibilidad, lo que conduce a que en un plazo de tiempo relativamente breve se produzca una separación de fases con la consiguiente pérdida de eficacia de los dispositivos. Así pues, en los últimos años se han venido aplicando distintas estrategias sintéticas que permitan

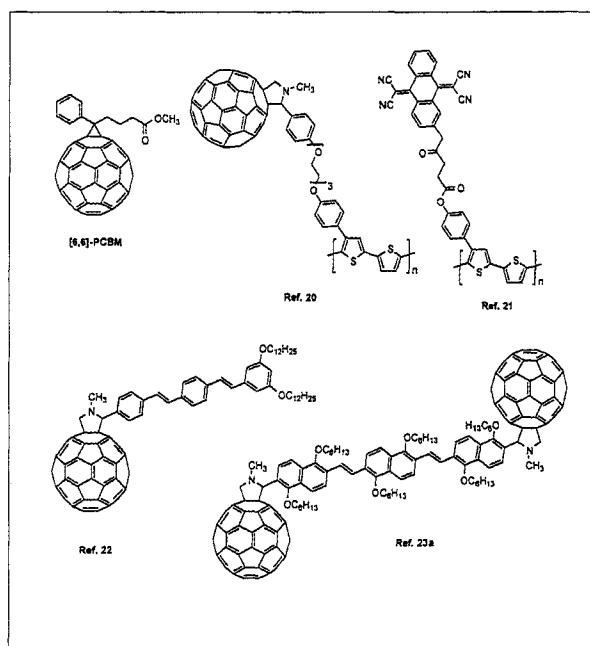


Figura 11.

aumentar la miscibilidad de las dos fases.

Desde el punto de vista químico se han seguido distintas aproximaciones para solucionar este problema. Por un lado, se ha llevado a cabo la síntesis de derivados de fullereno funcionalizados de manera adecuada para aumentar su miscibilidad con los polímeros conjugados. Así, un aumento significativo en la miscibilidad de estos materiales se ha observado cuando se sustituye el [60]fullereno por un derivado funcionalizado conocido como PCBM (Figura 11).

Otras rutas mucho más ambiciosas desde el punto de vista sintético son

las que se están desarrollando en la actualidad<sup>19</sup>. (i) Por un lado se persigue la incorporación del C<sub>60</sub> en estructuras de tipo polimérico en una aproximación conocida como "monocable", en la que los polímeros obtenidos con fullereno deberán mezclarse con los polímeros conjugados dadores. (ii) Otra aproximación es la conocida como "doble cable" que pretende funcionalizar los polímeros conjugados con C<sub>60</sub><sup>20</sup> y otras moléculas aceptoras derivadas de TCNQ<sup>21</sup>. La existencia de uniones covalentes entre las dos especies evitará el fenómeno de la separación de fases. (iii) Por último, se está dedicando un gran

esfuerzo a la unión covalente de sistemas oligoméricos conjugados a una o más moléculas de C<sub>60</sub> (Figura 11)<sup>22,23,24</sup>.

Estas nuevas aproximaciones conservan las características de los sistemas de mezclas polímero/C<sub>60</sub>, incluyendo la capacidad de generar un estado con separación de cargas tras el proceso de transferencia electrónica fotoinducida. Ya que estos nuevos materiales no deben presentar separación de fases, pueden considerarse actualmente como los candidatos más atractivos y de mayor futuro para la preparación de sistemas fotovoltaicos orgánicos.



## REFERENCIAS

- 1 K. S. Brown, *Science*, 1999, 285, 677-711.
- 2 A. Shah, P. Torres, R. Tscharnner, N. Wyrsh, H. Keppner, *Science* 1999, 285, 692-698.
- 3 (a) B. O'Regan, M. Grätzel, *Nature*, 1991, 353, 737-739. (b) M. K. Nazeerudin, A. Kay, I. Rodicio, R. Humphry-Baker, E. Müller, P. Lisa, N. Vlachopoulos, M. Grätzel, *J. Am. Chem. Soc.* 1993, 115, 6382-6390.
- 4 W. Wetzling, *Phys. Bl.* 1997, 53, 1197-1202.
- 5 A. Hagfeldt, M. Grätzel, *Acc. Chem. Res.* 2000, 33, 269.
- 6 U. Bach, D. Lupo, P. Comte, J. E. Moser, F. Weissörtel, J. Salbeck, H. Spreitzer, M. Grätzel, *Nature*, 1998, 395, 583-585.
- 7 D. Wöhrle, D. Meissner, *Adv. Mater.* 1991, 3, 129
- 8 D. Wöhrle, L. Kreienhoop, D. Schlettwein en Phthalocyanines, Properties and Applications. Ed.: C. C. Leznoff, A. B. P. Lever, 1996, Vol. 4. pp. 225-226.
- 9 C. W. Tang, *Appl. Phys. Letter.* 1986, 48, 183.
- 10 K.-Y. Law, *Chem. Rev.* 1993, 93, 449.
- 11 M. G. Harrison, R. H. Friend en *Electronic Materials: The oligomer approach*. Eds. K. Müllen, G. Wegner, Wiley, Meinheim, 1998, pp. 544-545.
- 12 (a) R. N. Marks, J. J. M. Halls, D. D. C. Bradley, R. H. Friend, A. B. Holmes, *J. Phys. Condens. Matter.* 1994, 6, 1379-1394. (b) M. Grandstrom, K. Petritsch, A. C. Arias, A. Lux, M. R. Anderson, R. H. Friend, *Nature* 1998, 395, 257.
- 13 G. Yu, J. Gao, J. C. Hummelen, F. Wudl, A. J. Heeger, *Science*, 1995, 270, 1789-1791.
- 14 El impacto que los polímeros conductores ha tenido sobre el desarrollo reciente de diferentes dispositivos optoelectrónicos ha conducido a la concesión del Premio Nobel de Química del año 2000 a sus descubridores, los profesores A. Heeger, A. McDiarmid y H. Shirakawa. Para más información, véase: N. Martín, *Anales R. S. E. Química*, 2000, 96 (4), 27.
- 15 T. Johannes, T. Soloman, O. Inganaas, *Synth. Met.* 1996, 82, 215-220.
- 16 Puede encontrarse una revisión reciente de la aplicación de los polímeros conjugados en dispositivos fotovoltaicos en: G. G. Wallace, P. C. Dastoor, D. L. Officer, C. O. Too, *Chem. Innovation* 2000, 30 (1), 14-22.
- 17 N. S. Sariciftci, L. Smilowitz, A. J. Heeger, F. Wudl, *Science* 1992, 258, 1474.
- 18 M. Grandstrom, K. Petritsch, A. C. Arias, A. Lux, M. R. Andersson, R. H. Friend, *Nature* 1998, 395, 257.
- 19 Estas diferentes aproximaciones se han desarrollado recientemente dentro del proyecto europeo Joule III (1998-2000) de título "Molecular plastic solar cells" (JOR3CT980206) en el que nuestro grupo de investigación ha participado como socio.
- 20 A. Cravino, G. Zerza, M. Maggini, S. Bucella, M. Svensson, M. R. Andersson, H. Neugebauer, N. S. Sariciftci, *Chem. Commun.* 2000, 2487.
- 21 G. Zerza, A. Cravino, H. Neugebauer, R. Gómez, J. L. Segura, N. Martín, M. Svensson, M. R. Andersson, N. S. Sariciftci, *J. Phys. Chem. A.*, en prensa.
- 22 (a) J.-F. Nierengarten, J.-F. Eckert, J.-F. Nicoud, L. Ouali, V. Krasnikov, G. Hadziioannou, *Chem. Commun.* 1999, 617. (b) J.-F. Eckert, J.-F. Nicoud, J.-F. Nierengarten, S.-G. Liu, L. Echegoyen, F. Barigelli, N. Armadori, L. Ouali, V. Krasnikov, G. Hadziioannou, *J. Am. Chem. Soc.* 2000, 122, 7467.
- 23 (a) J. L. Segura, N. Martín, *Tetrahedron Lett.* 1999, 40, 3239. (b) J. L. Segura, R. Gómez, N. Martín, C. Luo, D. M. Guldi, *Chem. Commun.* 2000, 701.
- 24 Para una revisión reciente de sistemas oligoméricos funcionalizados, véase: J. L. Segura, N. Martín, *J. Mater. Chem.* 2000, 10, 2403.